

EUROPEAN PATENT OFFICE

Patent Abstracts of Japan

PUBLICATION NUMBER : 10242512
PUBLICATION DATE : 11-09-98

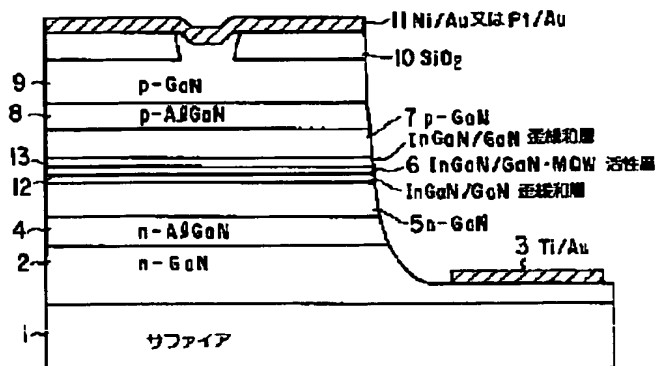
APPLICATION DATE : 24-02-97
APPLICATION NUMBER : 09039345

APPLICANT : TOSHIBA CORP;

INVENTOR : SASANUMA KATSUNOBU;

INT.CL. : H01L 33/00 H01S 3/18

TITLE : SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING
DEVICE



ABSTRACT : PROBLEM TO BE SOLVED: To improve the yield and quality of a semiconductor light emitting device and, at the same time, to decrease the threshold current density of the device, by forming an active layer to contain either a barrier layer or a well layer having a different composition or thickness from those of a barrier layer and a well layer as the central part of a super lattice in its terminating section.

SOLUTION: In order to solve such a problem that the light output of a central well layer is absorbed by an outside well layer, InGaIn/GaN strain relaxing layers 12 and 13 are formed adjacently to the upper end lower surface of an InGaIn/GaN multiple quantum well(MQW) active layer 6. It can be considered that the layers 12 and 13 also have super lattice structure and the structures at both ends of the active layer 6 are different from that at the central part. The InGaIn/GaN strain relaxing super lattices 12 and 13 work as buffer layers for making the strain applied to the MQW active layer 6 from a GaN guide layer zero.

COPYRIGHT: (C)1998,JPO

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-242512

(43) 公開日 平成10年(1998) 9月11日

(51) Int.Cl.⁶

H 0 1 L 33/00

H 0 1 S 3/18

識別記号

F I

H 0 1 L 33/00

H 0 1 S 3/18

C

審査請求 未請求 請求項の数5 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号

特願平9-39345

(22) 出願日

平成9年(1997) 2月24日

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72) 発明者 ジョン・レニー

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 波多腰 玄一

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

(72) 発明者 笹沼 克信

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

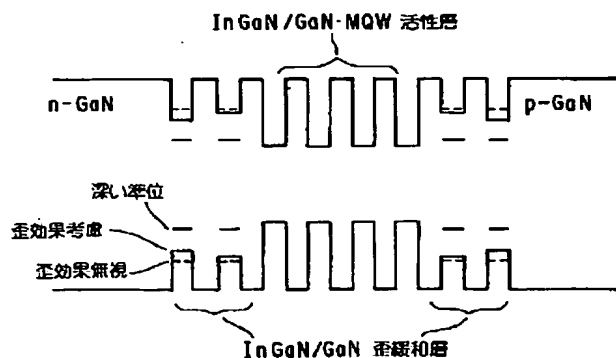
(74) 代理人 弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

(54) 【発明の名称】 半導体発光装置

(57) 【要約】

【課題】 Inを含むMQW活性層とガイド層との界面に生じる格子不整合を緩和し、低しきい値電流密度、低電圧動作の半導体発光装置を提供する。

【解決手段】 活性層とガイド層との界面近傍において活性層を構成する井戸層のIn組成を下げることにより、MQW活性層の発光効率を高める歪み緩和層を形成することができる。また活性層とガイド層との界面近傍において活性層を構成すると障壁層のIn組成を下げた組成変調層を導入することにより、界面近傍での井戸層と障壁層のバンドギャップ差を活性層中心領域のバンドギャップ差より大としてキャリアオーバーフロー効果を防止し、GaN系レーザ装置のしきい値電流密度と動作電圧を低減することができる。さらに本発明を用いればAlGaNキャップ層のAl組成を低組成にできるため、キャップ層による動作電圧の増加を最小にすることができる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 障壁層と井戸層とが交互に積層された超格子からなる活性層を有する半導体発光装置において、前記超格子からなる活性層は、前記超格子の中央部の障壁層及び井戸層とは少なくとも組成及び厚さのいずれかが異なる、少なくとも1つの障壁層及び井戸層のいずれかを終端部に含むものであることを特徴とする半導体発光装置。

【請求項2】 前記超格子からなる活性層は、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq x + y \leq 1$) からなる障壁層と、 $\text{In}_z\text{Al}_w\text{Ga}_{1-z-w}\text{N}$ ($x < z, 0 < z \leq 1, 0 \leq w \leq 1, 0 \leq z + w \leq 1$) からなる井戸層とが交互に積層された超格子からなるものであり、前記組成は少なくとも x 及び z のいずれか1つであることを特徴とする請求項1記載の半導体発光装置。

【請求項3】 ガイド層及びクラッド層及び障壁層と井戸層とが交互に積層された超格子からなる活性層を有する半導体発光装置において、前記超格子からなる活性層は、前記ガイド層及び前記クラッド層のいずれかと隣接する領域に、前記活性層の中央部と比べて前記井戸層と前記障壁層との平均組成が前記ガイド層及び前記クラッド層のいずれかの組成に近い積層領域を含むことを特徴とする半導体発光装置。

【請求項4】 ガイド層及びクラッド層及び障壁層と井戸層とが交互に積層された超格子からなる活性層を有する半導体発光装置において、前記超格子からなる活性層は、前記ガイド層及び前記クラッド層のいずれかと隣接する領域に、前記活性層の中央部と比べて前記井戸層と前記障壁層のバンドギャップの差を広げた積層領域を含むことを特徴とする半導体発光装置。

【請求項5】 前記超格子構造からなる活性層は、前記ガイド層及び前記クラッド層のいずれかとの間に、キャップ層を具備することを特徴とする請求項1乃至請求項4のいずれか1つに記載の半導体発光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は半導体発光装置に係り、特に低動作電圧及び低しきい値電流密度を有するGaN系半導体半導体発光装置に使用されるものである。

【0002】

【従来の技術】従来GaN系半導体発光装置は、Mgの添加によりp型GaN（以下p-GaNと略称する）の結晶成長に成功して以来、紫外及び青色領域の可視半導体レーザ及び半導体発光ダイオード（以下半導体レーザをLD、発光ダイオードをLEDと略称）として商品化が進められてきた。

【0003】GaN系LD、LEDの主な問題点は動作電圧が高いこと、及びLD発光のしきい値電流密度が大

きく活性層の発光効率が本来の値を示さないことである。その理由はLDの場合、SCH (Separate Confinement Heterostructure) 型のMQW (Multi Quantum Well) 量子井戸構造を有する活性層（以下MQW活性層と略称）に大きな歪みが存在し、活性層の結晶の品質が低下すること、及び特にMQW活性層の最初の数個の井戸層と最後の数個の井戸層に大きな歪みが発生し、前記活性層の中央部に比べて両端部の光放出と吸収が長波長側にずれることのためである。

【0004】ガイド層及びクラッド層から加わる歪みは、前記外側の井戸層で緩和され、MQW活性層の中央部に加わる歪みを低減する。歪み量が大い外側の井戸層は中央部に比べてバンドギャップが小となり、MQW活性層からの光出力が吸収されて減衰しGaN系LDのしきい値電流密度が増加する。

【0005】また前記ガイド層及びクラッド層から加わる歪みにより、外側の井戸層には格子欠陥が発生するので、この欠陥により生じた欠陥準位を通じて活性領域に注入された電子、正孔が再結合により消滅しGaN系LDの発光効率が低下する。同様な問題は均一な活性層を有するGaN系LEDについてもみられる。

【0006】これらの問題点を回避するために、従来MQW活性層の井戸層の数を例えば20個以上に増加する方法がとられてきた。このように井戸層の数を増加すれば、外側の井戸層の光吸収や電子、正孔の再結合による光出力の減衰効果を薄めることができる。

【0007】このほか、MQW活性層を構成する井戸層と障壁層との間にはヘテロ界面が形成され、このヘテロ界面には格子不整合によりある程度の欠陥が発生する。井戸層の数が多くなれば、MQW活性層に井戸層と障壁層の多くの界面が含まれることになり、界面における欠陥の発生によりMQW活性層中に再結合中心が導入され光利得が減少する。

【0008】このためGaN系LDにおいては、MQW活性層中でLD発光に必要な十分な利得を得るため、井戸層の数を増加しなければならないと考えられてきた。しかし、MQWの井戸数が多ければ電子、正孔の輸送が妨げられ、実際にLD発光に寄与する井戸層の数は2個～3個程度に限定される。従って、例えばIII-V族のMQW活性層を有するLDにおいて、最高の発光効率が得られる井戸層の数は大抵の場合10個以下とされてきた。

【0009】近年、高密度光ディスクの読み出し、書き込み用の短波長LDの必要性が高まりつつあるが、現在実用化されたInGaAlP系LDの発光波長はおよそ600nmであり、次世代DVDシステムに求められる波長400nm～430nmのLDを実現することは困難である。

【0010】GaN系LD、LEDは上記の波長領域のみならず、さらに短波長の光源となりうることが知られ

ている。しかしGa_{0.9}N系LD、LEDは、従来の材料に比べて製造方法に多くの技術的問題点が含まれる。その主なものは主要材料のGa_{0.9}NとIn_xGa_{1-x}N ($0 \leq x \leq 0.3$)との格子定数が異なることである。

【0011】InGa_{0.9}N(以下とくに必要な場合を除き、組成を示すサフィックスを省略)は通常活性層として用いられ、Ga_{0.9}Nはガイド層として用いられるが、両者の格子不整合が大きいため、活性層中のInの平均組成が10%を越えれば、活性層とガイド層の界面における歪みが大きくなる。このときp-Ga_{0.9}Nガイド層形成に必要な200℃～400℃程度の温度上昇を行えば、InGa_{0.9}N活性層が劣化又は破壊することが実験的に知られている。

【0012】従って通常活性層中のInの平均組成は10%以下とされるが、この場合にも活性層の劣化は存在し歩留まりが低下する。活性層の劣化は前記格子不整合によるもののほか、活性層中のInが移動または蒸発することが他の原因の1つと考えられ、このため活性層中のIn組成が不均一になり、低電圧動作のLD、LED、低しきい値電流密度のLDを得ることが困難になる。

【0013】一方Inの平均組成を下げれば電子及び正孔がLD発光に寄与する活性領域から外部に溢れるキャリアオーバーフロー効果を生じやすくなり、キャリア閉じ込めはもとより、光閉じ込めも悪くなるのでLD発光の効率向上のためには好ましくない。

【0014】このように、現状ではキャリア閉じ込めと光閉じ込めの双方から要求されるIn組成の大きい活性層を用いることができず、Ga_{0.9}N系LD、LEDの活性層の平均In組成は10%以下(井戸層のIn組成15%以下)に限定されてきた。

【0015】MQW活性層とp型ガイド層の間にキャップ層を導入することにより、p型ガイド層形成時の昇温過程で活性層に生じる劣化を保護し、かつキャリアオーバーフローを防止する技術も開発されているが、現状では劣化を完全に防止するに至っていない。

【0016】また、Ga_{0.9}N系LDにおいてはキャリアを構成する電子と正孔の内、電子密度が正孔密度に比べて大きいため、電子が活性層を通過してp側電極まで流れるキャリアオーバーフロー効果を生じやすく、これを防止するため前記キャップ層としてAl_xGa_{1-x}N ($x > 0.1$)を用いる必要があり、キャップ層のAl組成が大きいため動作電圧が高くなるという問題があった。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】上記したように、従来のGa_{0.9}N系LDはMQW活性層における歪みの影響を回避することを目的に、MQW活性層中の井戸数を過剰に設けていたため、LDの動作電圧としきい値電流密度が過大になるという欠点があった。

【0018】もし、MQW活性層の内部、及びその周辺層との格子定数の差による歪みの影響がなければ、井戸の数は少ない方がLD発光の効率は高くなる。本発明は上記の問題点を解決すべくなされたものであり、MQW活性層に加わる歪みの影響を除去することにより、少ない井戸数で高い発光効率を示すGa_{0.9}N系半導体発光装置を得ようとするものである。

【0019】従来、Ga_{0.9}N系LD、LEDの活性層とそれに隣接するガイド層との格子不整合が大きく、このため活性層のIn組成が大きい場合には、前記活性層とガイド層との界面に歪みのエネルギーが蓄積し、前記界面領域や活性層内部に格子欠陥を発生し、高品質のLDが得られず歩留まりも悪いという問題があった。また活性層のIn組成が小さい場合には、キャリアオーバーフロー効果が生じやすく、しきい値電流密度の低いLDが実現できないという問題があった。

【0020】本発明は上記の問題点を解決すべくなされたもので、ガイド層とMQW活性層との間に、このMQW活性層の井戸層・障壁層とは異なるIn組成または厚さを有する井戸層と障壁層とを介在させることにより、上記の相反する2つの問題を同時に解決し、歩留まりが高く高品質で、かつ、しきい値電流密度が低いGa_{0.9}N系LDを提供し、またLEDへの適用を図ることを目的とする。

【0021】

【課題を解決するための手段】本発明の半導体発光装置は、MQW活性層とガイド層又はクラッド層と隣接する領域に、格子定数の差から生じる歪みの影響を吸収するための井戸層と障壁層を設けることに特徴がある。このようにして、MQW活性層の井戸数を増加することなく、ストライプ状の活性層全域に亘って均一なLD発光を得ることができる。

【0022】また本発明の半導体発光装置は、MQW活性層とガイド層又はクラッド層と隣接する領域に、前記MQW活性層とは組成が異なる井戸層と障壁層を設け、その井戸層と障壁層の平均組成が隣接するガイド層又はクラッド層に近くなるようにして、ガイド層又はクラッド層と前記MQW活性層との界面に生ずる歪みを減少させ、また同時にMQW活性層を構成する井戸層と障壁層のバンドギャップ差を界面に近づくに従って広げることにより、キャリアオーバーフロー効果を防止することに特徴がある。

【0023】具体的には本発明の半導体発光装置は、障壁層と井戸層とが交互に積層された超格子構造からなる活性層を有し、前記活性層は、前記超格子の中央部の障壁層及び井戸層とは少なくとも組成及び厚さのいずれかが異なる、少なくとも1つの障壁層及び井戸層のいずれかを末端部に含むものであることを特徴とする。

【0024】好ましくは前記超格子構造からなる活性層は、In_xAl_yGa_{1-x-y}N ($0 < x \leq 1, 0 \leq y \leq$

1、 $0 \leq x+y \leq 1$) からなる障壁層と、 $\text{In}_x \text{Al}_w \text{Ga}_{1-z-w} \text{N}$ ($x < z$, $0 < z \leq 1$, $0 \leq z+w \leq 1$) からなる井戸層とが交互に積層された超格子からなるものであり、前記組成は少なくとも x および z のいずれか 1 つであることを特徴とする。

【0025】本発明の半導体発光装置は、超格子構造からなる活性層が、ガイド層及びクラッド層のいずれかと隣接する領域に、活性層の中央部と比べて井戸層と障壁層との平均組成がガイド層及びクラッドのいずれかの組成に近い積層領域を含むことを特徴とする。

【0026】また本発明の半導体発光装置は、超格子構造からなる活性層が、ガイド層及びクラッド層のいずれかと隣接する領域に、活性層の中央部と比べて井戸層と障壁層のバンドギャップの差を広げた積層領域を含むことを特徴とする。

【0027】また好ましくは本発明の半導体発光装置は、超格子構造からなる活性層が、ガイド層及びクラッド層のいずれかとの間に、キャップ層を具備することを特徴とするものである。

【0028】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。はじめに各実施の形態に共通する事項について具体的に説明する。現在開発されている GaN 系 LD の断面構造を図 11 に示す。GaN 系 LD は、サファイア基板 1、 n -GaN コンタクト層 2、Ti/Au 下部電極 3、 n -AlGaIn クラッド層 4、 n -GaN ガイド層 5、 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{N}$ /GaN からなる MQW 活性層 6 (以下 InGaIn/GaN・MQW 活性層と略称)、 p -GaN ガイド層 7、 p -AlGaIn クラッド層 8、 p -GaN コンタクト層 9、 SiO_2 膜 10、Ni/Au 上部電極 11 からなっている。

【0029】活性層は通常 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{N}$ /GaN ($0 < x < 0.3$) の井戸数が 20 程度の MQW 活性層により構成されている。AlGaIn クラッド層はバンドギャップの値が大きく、キャリア閉じ込めと光出力の活性層への閉じ込めを行うことができる。

【0030】図 11 に示す GaN 系 LD は、LD を構成する多層構造がサファイア基板上に形成されている。また LD 発光のしきい値電流密度を低減するため、 SiO_2 絶縁膜 10 を用いてストライプ状の電流狭窄構造を形成する。このほか、例えば埋め込みストライプ型のような他の電流狭窄構造を用いることもできる。

【0031】図 12 は前記 GaN 系 LD の活性領域近傍の詳細を示すバンド構造図である。簡単のため井戸数は 5 個の場合が示されている。通常の 2 重ヘテロ接合型 LD の構造から、図 12 に示すような MQW 活性層を有する GaN 系 LD の構造を類推することができる。

【0032】しかし、活性領域とこれを囲む光ガイド領域との間には格子定数の差があるので、これが MQW 活性層を有する LD の構造を制限する。GaN 系 LD を構

成する材料の組成とバンドギャップ、及び格子定数との間の関係を図 13 に示す。

【0033】GaN 系 LD の活性層は $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{N}$ を用いて形成し、ガイド層は通常 GaN、クラッド層は $\text{Ga}_y \text{Al}_{1-y} \text{N}$ を用いて形成される。図 13 において x を 1 から 0 まで変化すれば、図の GaN の点と InN の点とを結ぶ直線に沿ってバンドギャップと格子定数とが変化し、 y を 1 から 0 まで変化すれば GaN の点と AlN の点とを結ぶ直線に沿ってバンドギャップと格子定数とが変化する。

【0034】LD の発光効率を高めるためには、活性層と導波層との間及び導波層とクラッド層との間に一定のバンドギャップの差を設けることが必要となる。図 13 から GaN と InN とを結ぶ直線の横軸に対する傾斜は、GaN と AlN とを結ぶ直線の横軸との傾斜に比べて大きいので、同程度のバンドギャップの差に対して、GaN 導波層と InGaIn 活性層との間の格子定数の差の方が、GaN 導波層と AlGaIn クラッドとの間の格子定数の差に比べて大きいことがわかる。なお図 13 では、一例として $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{N}$ 活性層の組成 $x=0$ 、2 の場合の活性層と GaN 導波層との間に生じる格子不整合の程度が示されている。

【0035】このように、InGaIn 活性層に対してその周辺材料から加わる歪みに着目すれば、前記 InGaIn 活性層に隣接する GaN 導波層によるものが大きく、これに比べて AlGaIn クラッド層の組成変化から加わるものは小さい。従って InGaIn/GaN・MQW 活性層についても、同様に GaN ガイド層との格子不整合によって前記 MQW 活性層とガイド層の界面に歪みが蓄積されることを図 13 から読み取ることができる。

【0036】上記の説明では、MQW 活性層の上下に隣接して GaN ガイド層が形成され、さらにその上下に隣接して AlGaIn クラッド層が形成される場合についてのべたが、GaN 系 LD、LED の構造は必ずしもこれに限定されるものではなく、活性層にクラッド層が隣接する場合や、均一な活性層にガイド層、クラッド層が隣接する場合等、種々の組み合わせが存在する。

【0037】例えば MQW 活性層に AlGaIn クラッド層が直接隣接する場合についても、図 13 から両者の格子不整合が大きく、その界面に歪みが蓄積するは明らかである。また活性層が MQW 構造でなくて均一な InGaIn であっても、GaN 導波層との界面に歪みが蓄積されることがわかる。

【0038】格子歪み零の LD、LED を形成する方法として、例えば $\text{In}_x \text{Al}_w \text{Ga}_{1-z-w} \text{N}$ ($0 \leq z+w \leq 1$) のような 4 元化合物を用いる方法がある。このとき z と w とを制御すれば、図 12 の 3 角形の範囲内において格子定数の値を変化することなくバンドギャップのみを連続的に変化することができるので、原理的には格子歪み零の LD、LED を設計することができる。

【0039】しかし、実際には2個の組成パラメータ z と w とを最適条件に制御しつつ良好な結晶成長を行うことはいちじるしく困難であり、また、このような4元系化合物の材料特性も十分には解明されていないのが現状である。

【0040】従って實際上Ga_xN系LD、LEDの構成材料は2元、3元化合物に限定され、上記格子不整合により生じた歪みにより、MQW活性層は図14に示すような構造のものとなる。すなわちGa_xN導波層からの歪みにより、図12に示した無歪み状態のMQW活性層のバンド構造が変形し、外側の井戸層は中央部の井戸層に比べてバンドギャップの幅が狭くなる。

【0041】図14から、中央部の井戸層から放出された光は、歪みによりバンドギャップが縮小した外側の井戸層において吸収されることがわかる。またこのような歪みは外側の井戸層のバンド間に欠陥準位を生じ、その光吸収も無視することができない。

【0042】次に図1に基づき本発明の第1の実施の形態について説明する。図1は、本発明の第1の実施の形態に係る、MQW活性層を有するGa_xN系LDの構造を示す断面図である。上記したように、中央部の井戸層の光出力が外側の井戸層により吸収されるという問題を解決するために、InGa_{1-x}N/Ga_xN・MQW活性層6の上下に隣接してInGa_{1-x}N/Ga_xN歪緩和層12、13を導入した。なお図2に示すように、前記歪緩和層も超格子構造を有し、MQW活性層の両端の構造を中央部と変化させたものとみなすことができる。

【0043】その他のLDの構造は図11に示したものと同様である。前記InGa_{1-x}N/Ga_xN歪緩和超格子12、13は、Ga_xNガイド層からMQW活性層6に加わる歪みを零にするバッファ層として作用する。

【0044】MQW活性層6、歪緩和層12、13、Ga_xN導波層5、7、AlGa_{1-x}Nクラッド層4、8からなる本第1の実施の形態に係るGa_xN系LDのバンド構造を図2に示す。但し図2においては、前記材料間の格子定数の差に基づく歪効果は考慮せず、単に材料の組成のみで決まるバンド構造を示している。

【0045】ここにMQW活性層6の井戸層となるIn_xGa_{1-x}Nの組成は $x=0.2$ であり、図1で説明した従来の典型的なGa_xN系LDの x の値の範囲内である。MQW活性層の障壁層は、Ga_xNか又はIn組成の非常に小さいIn_xGa_{1-x}N ($0 < x < 0.05$)を用いた。

【0046】歪緩和層中の井戸層は、In_xGa_{1-x}N ($x=0.05$)を用いて形成したが、このときIn組成 x はMQW活性層の井戸層のIn組成の $1/4 \sim 1/3$ の値までのものを用いることができた。歪緩和層中の障壁層はGa_xNか又はIn組成の非常に小さいIn_xGa_{1-x}N ($0 < x < 0.05$)を用いた。図2では歪緩和層中の障壁層としてGa_xNを用いる場合が示されてい

る。

【0047】歪緩和層の井戸数はMQW活性層の井戸層となる材料の組成で定まる。歪緩和層の井戸層のIn組成とMQW活性層の井戸層のIn組成との比が大きい程歪み量は大きく、歪みを零にするための歪緩和層の井戸数も大きくしなければならない。しかし、前記井戸数の範囲としては2～5程度で十分な効果が得られた。

【0048】歪効果を考慮した本第1の実施の形態におけるGa_xN系LDのInGa_{1-x}N/Ga_xN・MQW活性層、InGa_{1-x}N/Ga_xN歪緩和層、Ga_xN導波層のバンド構造を図3に示す。このように歪緩和層中の井戸層の材料が適切に選択されていれば、歪効果を考慮しても前記歪緩和層のバンドギャップはMQW活性層のバンドギャップより大きな値を維持することができる。

【0049】また歪みにより前記歪緩和層中に生じた欠陥の深い準位についても、図3に示すように、MQW活性層のバンドギャップの外側に位置することになり、欠陥の深い準位によるキャリア再結合の確率は、MQW活性層におけるキャリアの直接再結合の確率に比べて無視できることがわかった。

【0050】次に図4乃至図6に基づき、本発明の第2の実施の形態について説明する。図13から明らかなように、井戸層のIn組成は障壁層のIn組成より大きくなっている。MQW活性層は通常3から30程度の井戸層と障壁層の繰り返しから構成される。

【0051】ガイド層は通常単層のGa_xNからなり、またクラッド層はAl_xGa_{1-x}N ($0 < x \leq 0.3$)から構成される。MQW活性層の平均In組成が10%を越えれば、MQW活性層とガイド層との界面に歪みが生じ、高品質なMQW活性層が得られないことが知られている。

【0052】図12に示すように、通常InGa_{1-x}N/Ga_xN・MQW活性層中では、井戸層と障壁層の組成及び膜厚は一定にされるため、井戸層の示すバンドギャップと障壁層の示すバンドギャップは活性層中でそれぞれ一定に保たれる。

【0053】図6は図4に示す構造のGa_xN系LDのMQW活性層及びその近傍における井戸層のIn組成、障壁層のIn組成、活性層の平均In組成、及びバンドギャップを模式的に示したものである。第2の実施の形態においては、In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}NからなるMQW活性層（以下InGa_xN・MQW活性層と略称）を用いた場合について説明する。

【0054】井戸層のIn組成20%、厚さ2nm、障壁層のIn組成5%、厚さ4nmとすれば、このときのInの平均組成は約10%になる。このようにInの平均組成が10%に近い又はそれ以上であれば、InGa_xN・MQW活性層とGa_xNガイド層との間に生じる歪みが過大になり、高品質のGa_xN系LDを得ることが困難であった。

【0055】この問題を解決するために、本第2の実施の形態において、図4に示す断面構造のGa_{0.5}N系LDを試作した。図11の従来構造との違いはIn_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}NからなるMQW活性層（以下InGa_{0.5}N・MQW活性層と略称）6と、Ga_{0.5}Nガイド層5、7との間に、InGa_{0.5}N・MQW活性層6の障壁層に比べて、障壁層のIn組成が低いIn_zGa_{1-z}N/In_wGa_{1-w}Nからなる組成変調層（以下InGa_{0.5}N組成変調層と略称）14、15を設け、全体として前記InGa_{0.5}N・MQW活性層とGa_{0.5}N導波層との界面近傍における平均In組成を減少させたことに特徴がある。

【0056】InGa_{0.5}N・MQW活性層とその両側のGa_{0.5}N導波層との間に形成されたInGa_{0.5}N組成変調層等のバンド構造を図5に示す。このように本第2の実施の形態においては、InGa_{0.5}N・MQW活性層とその両側のInGa_{0.5}N組成変調層を含めて、基本的にはMQW活性層の周期性が保たれ、単に障壁層の組成を变化することにより、エネルギーバンドの振幅が変調されたようになるので、前記InGa_{0.5}N・MQW活性層とGa_{0.5}N導波層との間に導入した層をInGa_{0.5}N組成変調層とよぶことにした。

【0057】次に本第2の実施の形態のGa_{0.5}N系LDのしきい値電圧及びしきい値電流密度について、シミュレーションを行った結果について説明する。本シミュレーションにおいては、InGa_{0.5}N組成変調層中の障壁層のIn組成を0%、すなわちこの障壁層をGa_{0.5}Nであるとした。

【0058】しかし、井戸層と障壁層との材料物性に急激な変化を生じないことが高品質のLDの多層構造を得る上から望ましいので、前記障壁層をGa_{0.5}Nとせず、Inを数%程度添加した障壁層とすることもできる。但しInGa_{0.5}N・MQW活性層の中心付近における障壁層のIn組成に比べれば、組成変調層中の障壁層のIn組成は大幅に減少させるようにした。

【0059】図5は、図4に示すGa_{0.5}N系LDの活性層6と組成変調層14、15とガイド層5、7及びクラッド層4、8のバンド構造を示す模式図である。図5からInGa_{0.5}N・MQW活性層の両端部のInGa_{0.5}N組成変調層において、井戸層と障壁層のバンドギャップの差がMQW活性層中心付近に比べて広がる様子が示されている。

【0060】図6は図5の活性層6の近傍領域を取り出して、バンド構造と平均In組成との関連を示したものである。上記のようにInGa_{0.5}N・MQW活性層の両端部にInGa_{0.5}N組成変調層を導入したGa_{0.5}N系LDは、第1の実施の形態でのべたように、InGa_{0.5}N・MQW活性層とGa_{0.5}Nガイド層の界面での歪みの影響を緩和する作用があるばかりでなく、LD装置として次のような特性上の利点がある。

【0061】Ga_{0.5}N系LDの動作電圧と、InGa_{0.5}N・

MQW活性層中の井戸数との関係を図7に示す。図の実線は前記第2の実施の形態に係るInGa_{0.5}N組成変調層を有する場合であり、破線は比較のために示した組成変調層を有しない、従来のGa_{0.5}N系LDに関するシミュレーション結果である。このシミュレーションでは、p型ガイド層、p型クラッド層のキャリア密度は共に $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ として計算を行った。なおシミュレーション結果を示す各曲線に付したパラメータは、前記InGa_{0.5}N・MQW活性層の（井戸層のIn組成/障壁層のIn組成）を例えば（20%/5%）等として示している。

【0062】前述したようにInGa_{0.5}N組成変調層の障壁層はGa_{0.5}N、その井戸層のIn組成は前記InGa_{0.5}N・MQW活性層中の井戸層のIn組成と等しくしている。シミュレーションに用いた井戸層の厚さは2nm、障壁層の厚さは4nmである。また組成変調層を含む場合、図8横軸のMQW井戸数は、MQW活性層の井戸数に組成変調層に含まれる井戸数を加えたものであり、組成変調層を含まない場合のMQW井戸数は、MQW活性層の井戸数そのものである。

【0063】図7に示すように、InGa_{0.5}N・MQW活性層を有するGa_{0.5}N系LDの動作電圧は井戸数の増加と共に増加する。さらに同一のパラメータの値20%/5%について比較すれば、実線で示す組成変調層を含むGa_{0.5}N系LDの動作電圧は、MQW井戸数の増加と共に、組成変調層を含まない従来のGa_{0.5}N系LDの動作電圧に比べて低くなることがわかる。

【0064】動作電圧が低くなる理由は、InGa_{0.5}N・MQW活性層とGa_{0.5}Nガイド層との間にInGa_{0.5}N組成変調層を含む本発明のLDでは、前記活性層と前記ガイド層の界面に前記組成変調層の障壁層が存在することにより、図6に示すように、実効的なヘテロ障壁が界面においてなだらかになるためである。

【0065】次にしきい値電流密度のMQW井戸数依存性を図8に示す。p-Ga_{0.5}Nガイド層、p-AlGa_{0.5}Nクラッド層のキャリア密度は共に $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ として計算を行った。その他のシミュレーション条件や、各曲線に付したパラメータの意味は図7と同様である。

【0066】図8に示すように、MQW活性層を有するGa_{0.5}N系LDのしきい値電流密度もMQW井戸数の増加と共に増加する。しかし井戸層/障壁層のIn組成比が20%/5%の場合、組成変調層を含むGa_{0.5}N系LDは組成変調層を含まない従来のGa_{0.5}N系LDに比べてしきい値電流密度が最大30%も減少することがわかる。

【0067】このことから、InGa_{0.5}N・MQW活性層の両端にIn組成の低い障壁層を設けて、組成変調層として作用する前記障壁層のバンドギャップの値をMQW活性層内の障壁層より拡大すれば、キャリアのオーバーフロー効果が抑制され、かつしきい値電流密度が大幅に減少することがわかる。

【0068】図7と図8に破線で示した組成変調層を含まない従来のMQW活性層のシミュレーション結果を比較すれば、In組成比の変化に対して、同一井戸数における動作電圧と動作電流密度との大小関係が逆転しており、従来のGaN系LDにおいて、動作電圧の低減としきい値電流密度の低減とは互いに相反する課題であったことがわかる。

【0069】これに対して組成変調層を含む本第2の実施の形態におけるMQW活性層では、動作電圧低減としきい値電流密度の低減とが同時に達成されることに大きな特徴がある。すなわち、従来相反する要求として解決できなかった低電圧、低しきい値電流密度で動作するという、実用的上もっとも重要な課題が本第2の実施の形態に示した組成変調層を含むMQW活性層により始めて達成されることが明らかになった。

【0070】次に図9に基づき本発明の第3の実施の形態について説明する。従来しきい値電流密度を下げるためには、活性層とp型ガイド層との間にAlGaNキャップ層をはさむ必要があったが、AlGaNキャップ層はしきい値電流密度の低減には効果的であるが、動作電圧低減の目的に対しては不利である。

【0071】 $Al_xGa_{1-x}N$ キャップ層をInGaN・MQW活性層とp-GaNガイド層との間に介在させ、前記キャップ層のAl組成xを変化させた場合について、GaN系LDの動作電圧のMQW井戸数依存性をシミュレーションにより求めた結果を図9に示す。このシミュレーションに用いたGaN系LDの構造は、活性層がInGaN・MQWであること、また $x > 0$ の場合、前記InGaN・MQW活性層6とp-GaNガイド層7との間にAlGaInキャップ層が存在することが図11に示すGaN系LDと異なる。

【0072】前記シミュレーションに用いたLDの主要部は、n-GaNコンタクト層2 ($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.1 \mu\text{m}$)、n-AlGaInクラッド層4 ($1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.3 \mu\text{m}$)、アンドープのi-GaNガイド層5 (厚さ $0.1 \mu\text{m}$)、 $In_{0.15}Ga_{0.85}N$ (2.5 nm) / $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ (5 nm)・MQW活性層6、p型又はアンドープi型 $Al_xGa_{1-x}N$ キャップ層 (p型の場合 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ20 nm)、p型又はアンドープi型GaNガイド層7 (p型の場合 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.1 \mu\text{m}$)、p- $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ クラッド層8 ($1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.3 \mu\text{m}$)、p-GaNコンタクト層9 ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さ $0.1 \mu\text{m}$) からなっている。

【0073】図9に示すように、キャップ層を加えればキャップ層がない場合に比べて動作電圧が増加する。キャップ層のAl組成xを増加すれば、前記キャップ層の障壁高さが増加するので動作電圧は増加することがわかる。キャップ層とガイド層とを導電性とした場合とアンドープi型とした場合との差は小さいが、導電性とする

方がやや動作電圧を低くすることができる。

【0074】第3の実施の形態におけるGaN系LDは、前記第2の実施の形態で説明した組成変調層のしきい値電流密度の低減効果と、前記キャップ層のしきい値電流密度の低減効果との相乗効果により動作電圧の増加を抑制しつつ最適化を図り、低消費電力のGaN系LDを得ようとするものである。

【0075】すなわち第2の実施の形態の組成変調層を含むGaN系LD作製する際、前記組成変調層とこれに隣接する導波層との間にさらに前記キャップ層を用いれば、しきい値電流密度低減のため従来求められていたAl組成の大きい $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.1 \leq x \leq 0.2$) キャップ層を用いる必要がなくなり、Al組成の小さい $Al_xGa_{1-x}N$ ($x \leq 0.05$) を用いることができるので、図9のシミュレーション結果から動作電圧低減に極めて効果的であることがわかる。このときキャップ層の作用として、このキャップ層がない場合に比べてしきい値電流密度がさらに低下することはいうまでもない。

【0076】次に図10に基づき、本発明の第4の実施の形態について説明する。本第4の実施の形態におけるGaN系LDは、前記第1の実施の形態で説明した歪緩和層の作用と前記第2の実施の形態で説明した組成変調層の作用とを組み合わせることにより、両者の利点を相乗的に発揮しようとするものである。

【0077】すなわち図10に示すように、InGaN・MQW活性層の両側に隣接してInGaN組成変調層を形成し、さらにその外側に隣接してInGaN/GaN歪緩和層を形成し、その両端に隣接してGaN導波層を形成する。

【0078】このようにすれば、前記歪緩和層及び前記組成変調層の作用により、GaN導波層とInGaNからなるMQW活性層との間の格子定数差に基づく歪みを前記MQW活性層中でほぼ零とすることができ、また歪み緩和の際、前記歪緩和層に生じた欠陥準位やバンドギャップの変化を、全てMQW活性層の井戸層のバンドギャップの外側の範囲内とすることにより過剰吸収を除外することができる。

【0079】またInGaNからなる組成変調層の作用として、さらに歪低減に役立つことのほか、キャリアオーバーフロー効果を抑制し、GaN系LDのしきい値電流密度を大幅に低減することができる。さらに動作電圧を高めることなくしきい値電流密度を低減するには、第3の実施の形態にのべたキャップ層を組み合わせることが有効であることはいうまでもない。

【0080】なお本発明は上記の実施の形態に限定されることはない。上記の実施の形態において、歪緩和層及び組成変調層はいずれもMQW構造に形成され、歪緩和層は主として井戸層のIn組成をMQW活性層の井戸層よりも小さくし、また組成変調層は主として障壁層のI

n組成を前記MQW活性層の障壁層よりも小さくして、それぞれバンドギャップの値を制御することによりその機能を達成している。

【0081】また組成変調層の機能として、障壁層と井戸層の組成と厚さを調整し、これらの平均組成を隣接するガイド層やクラッド層に近付けることをのべた。しかしMQW又は井戸数が1つのSQW (Single Quantum Well) 構造において、とくに井戸層の厚さが極めて小さい領域では、井戸層の実効的なバンドギャップの値は井戸層の組成ばかりでなく井戸層の厚さのみによっても変化することができる。

【0082】従って前記歪緩和層や組成変調層と同様の機能をMQWを構成する層の組成のみならず、厚さを変化することによっても達成することができる。このとき厚さとIn組成とを共に変化することにより、機能の最適化が図れることはいうまでもない。

【0083】また上記の実施の形態において、活性層、歪緩和層及び組成変調層の構造として、井戸層/障壁層が $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{N} / \text{GaN}$ ($0 < x \leq 1$) または $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{N} / \text{In}_y \text{Ga}_{1-y} \text{N}$ ($0 < x \leq 1, x > y, 0 < y \leq 1, 0 \leq x + y \leq 1$) からなるMQWである場合について説明したが、 $\text{In}_x \text{Al}_y \text{Ga}_{1-x-y} \text{N} / \text{In}_z \text{Al}_w \text{Ga}_{1-z-w} \text{N}$ ($0 < x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq x + y \leq 1$ 及び $x > z, 0 < z \leq 1, 0 \leq w \leq 1, 0 \leq z + w \leq 1$) からなるMQWを用いる場合にもInの組成を制御することにより、同様の機能を得ることができる。

【0084】また本発明はMQW活性層を有するGaN系LEDについて説明したが、必ずしもGaN系LEDに限定されるものではない。MQW活性層を有する化合物半導体からなる発光装置であれば全て本発明を適用することができる。また例えば本発明の歪緩和層はMQW活性層に隣接して形成することに限定されるものではなく、従来の均一な組成の活性層を有するGaN系LEDに対しても同様の機能を発揮することができる。その他本発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々に変形して実施することができる。

【0085】

【発明の効果】上述したように本発明の半導体発光装置によれば、活性層とガイド層または活性層とクラッド層との間の格子不整合を緩和し、界面における歪みを減少させ、低電圧、低しきい値電流密度で動作する高品質なGaN系半導体発光装置を高い歩留まりで作製することが可能となる。特に活性層の平均In成が10%以上の場合に本発明の半導体発光装置が優れた効果を発揮する。

【0086】また活性層とガイド層との界面に近い領域において、活性層中の井戸層及び障壁層のバンドギャップの差を拡大することにより、キャリア閉じ込めの効率を高めてキャリアオーバーフロー効果を防止し、レーザ

発光のしきい値電流密度を低減することができる。

【0087】さらに活性層の平均組成とガイド層の組成との差が界面に近い領域において減少するため、界面に生じる実効的なヘテロ障壁が低くなり、キャリアオーバーフローの抑制効果を維持しつつ動作電圧を低減することができる。さらにキャップ層の付加による動作電圧の増加を最小限に抑制する効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施の形態に係る半導体発光装置の構造を示す断面図。

【図2】本発明の第1の実施の形態に係る半導体発光装置のMQW活性層、ガイド層、クラッド層の歪み効果を無視したバンド構造図。

【図3】本発明の第1の実施の形態に係る半導体発光装置のMQW活性層、ガイド層、クラッド層の歪み効果を考慮したバンド構造図。

【図4】本発明の第2の実施の形態に係る半導体発光装置の構造を示す断面図。

【図5】本発明の第2の実施の形態に係る半導体発光装置のMQW活性層、ガイド層、クラッド層のバンド構造図。

【図6】本発明の第2の実施の形態に係る半導体発光装置のMQW活性層の平均In組成とバンド構造との関係を示す図。

【図7】本発明の第2の実施の形態に係る半導体発光装置の動作電圧のMQW井戸数依存性を、従来の半導体発光装置と比較した図。

【図8】本発明の第2の実施の形態に係る半導体発光装置のしきい値電流密度のMQW井戸数依存性を、従来の半導体発光装置と比較した図。

【図9】本発明の第3の実施の形態に係るAlGaNキャップ層のAl組成に対する動作電圧のMQW井戸数依存性の変化を示す図。

【図10】本発明の第4の実施の形態に係る半導体発光装置のMQW活性層近傍領域のバンド構造図。

【図11】従来のMQW活性層を有する半導体発光装置の断面図。

【図12】従来の半導体発光装置のMQW活性層近傍領域のバンド構造図。

【図13】半導体発光装置を構成するInN、GaN、AlN混晶の格子定数とバンドギャップの関係を示す図。

【図14】従来の半導体発光装置におけるMQW活性層のGaNガイド層と隣接する領域の歪みの影響を示すバンド構造図。

【図15】従来の半導体発光装置のMQW活性層の特徴を示すバンド構造図。

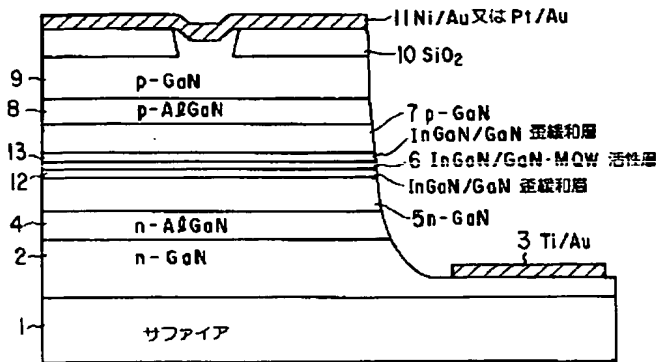
【符号の説明】

- 1…サファイア基板
- 2…n-GaNコンタクト層

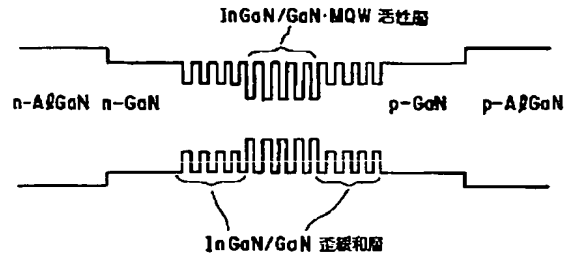
- 3...Ti/Au下部電極
 4...n-AlGaInクラッド層
 5...n-GaNガイド層
 6...InGaIn/GaN、MQW活性層
 7...p-GaNガイド層
 8...p-AlGaInクラッド層

- 9...p-GaNコンタクト層
 10...SiO₂膜
 11...Ni/Au又はPt/Au上部電極
 12、13...InGaIn/GaN歪み緩和層
 14、15...InGaIn組成変調層

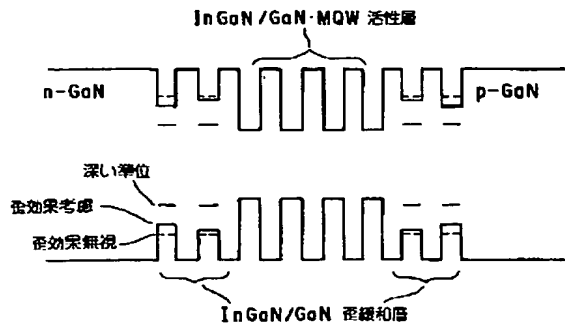
【図1】



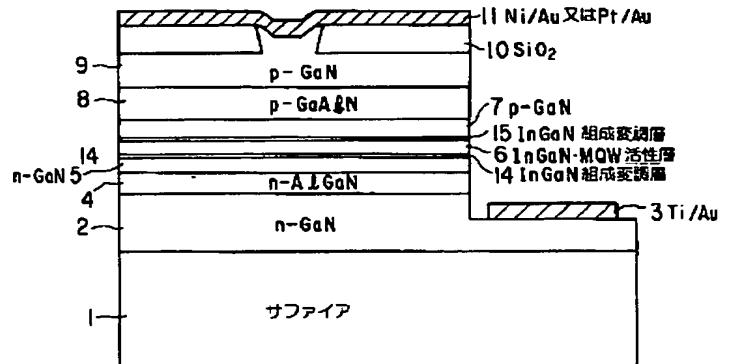
【図2】



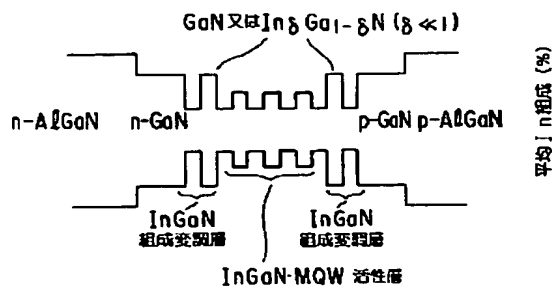
【図3】



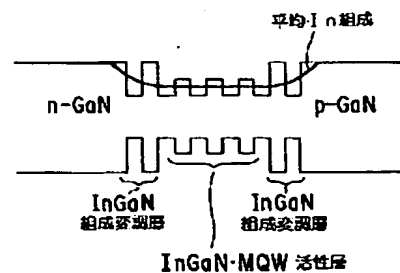
【図4】



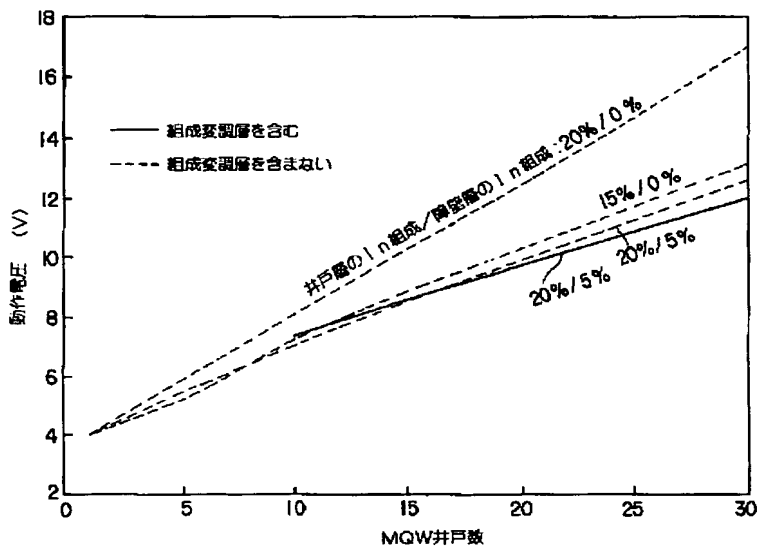
【図5】



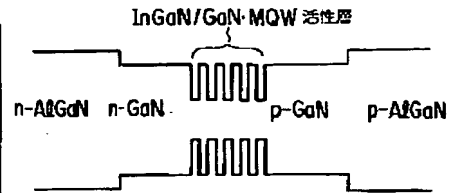
【図6】



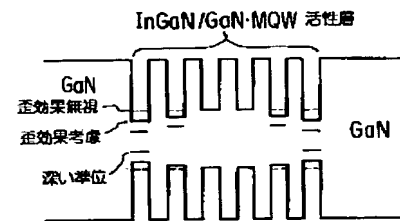
【図7】



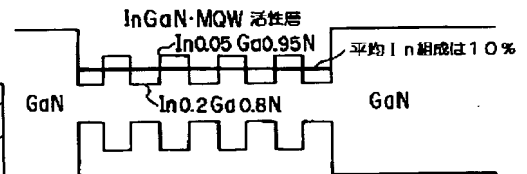
【図12】



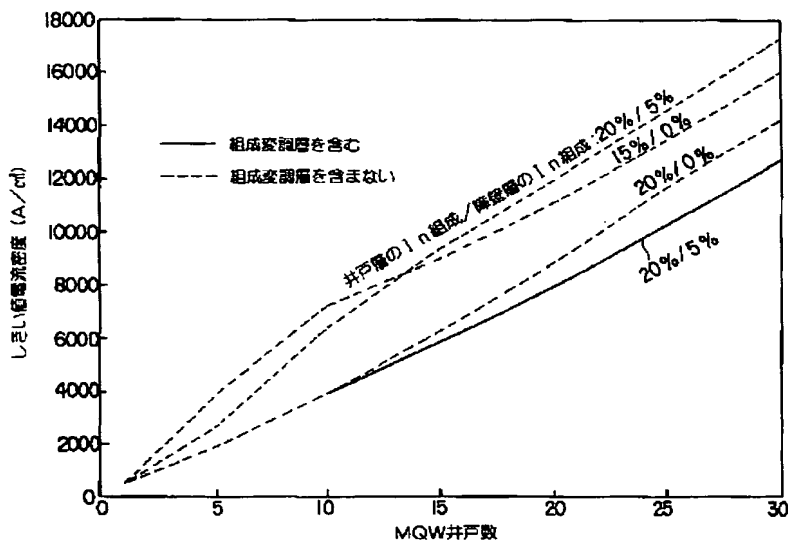
【図14】



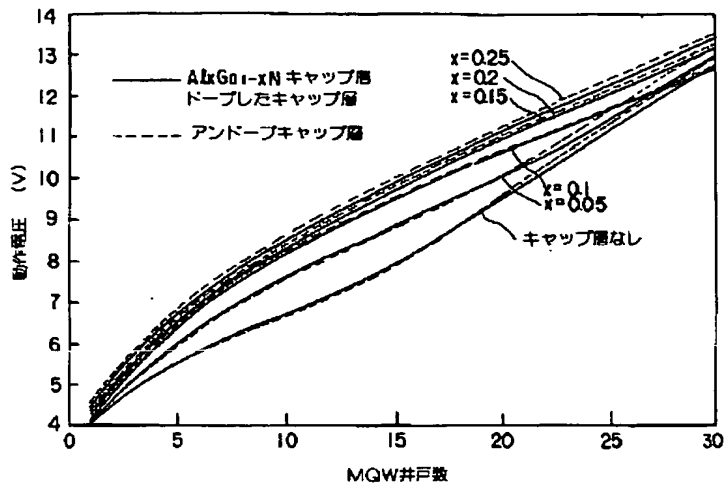
【図15】



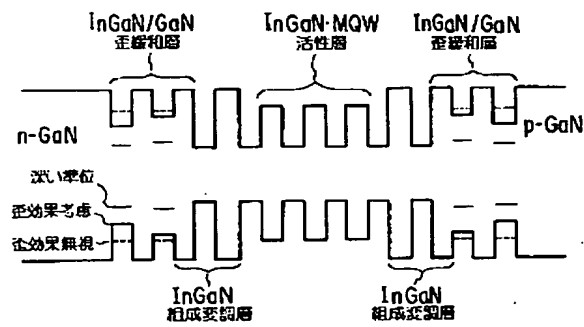
【図8】



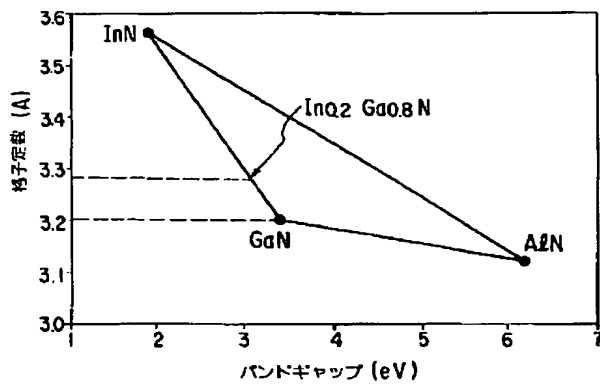
【図9】



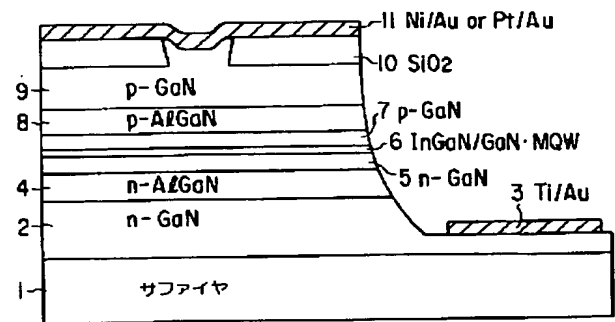
【図10】



【図13】



【図11】



THIS PAGE BLANK (USPTO)